

# 柴油发电机余热在海岛能源供应中的应用研究

袁韩生, 孙锦余, 刘巍

(南电能源综合利用股份有限公司, 广州 510530)

**摘要:** [目的]当前,我国大部分海岛主要通过配备柴油发电机来提供电力供应,这种供能形式存在供能成本高昂、能源利用效率低下等问题。为解决海岛供能存在的问题。[方法]从分布式供能的角度出发,针对某海岛的能源需求现状,设计了综合利用该海岛柴油发电机余热的方案。[结果]研究表明:该方案提高了能源的利用效率,有效减轻了海岛的供能压力,且减少约20%的制冷成本。[结论]所提出的方案有利于能源效率的提高,且具有投资经济性,对改善海岛生产生活条件,具有重大的现实意义。

**关键词:** 海岛供能; 分布式供能; 余热; 能源利用效率

中图分类号: TK115

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2019)S1-0001-06

## Application of Diesel Engine Waste Heat in Island Energy Supply

YUAN Hansheng, SUN Jinyu, LIU Wei

(Nandian Synthesis Energy Utilization Co., Ltd., Guangzhou 510530, China)

**Abstract:** [Introduction] At present, most of the islands in China supply electricity mainly by equipping diesel generators. This form of energy supply has the problems of high cost and low efficiency of energy utilization. [Method] According to the current situation of energy demand in an island, this paper designed a scheme of comprehensive utilization of the waste heat of diesel generator in the island from the point of view of distributed energy supply, in order to solve the problem of island energy supply. [Result] The scheme improves the efficiency of energy utilization, reduces the pressure of island energy supply effectively, and reduces about 20% of the refrigeration cost. [Conclusion] The scheme proposed in this paper is conducive to the improvement of energy efficiency and investment economy. It has important practical significance for improving the production and living conditions of the island.

**Key words:** island energy supply; distributed energy supply; waste heat; energy utilization efficiency

我国海疆辽阔,岛屿众多,据相关的文献<sup>[1]</sup>,我国沿海11个省区市有7 300个500 m<sup>2</sup>以上的岛屿,主要分布在东海和南海。随着我国海洋经济的快速发展和不断完善,海洋的战略地位日益突出,一些海岛的开发管理已迫在眉睫,而这当中,海岛能源的开发、利用显得非常重要。

相关的资料显示<sup>[2]</sup>,目前我国海岛的能源开发和利用状况还相对不平衡,仅有少数靠近大陆的岛屿通过海底电缆或架空输电线路与大电网联通,由大电网供电,其他能源需求依靠电能转换。偏远海岛主要是通过配备柴油发电机来提供能源供应,这

种供能形式存在供能成本高昂、能源利用效率低下等问题<sup>[3]</sup>。本文从分布式供能角度出发<sup>[2,4-5]</sup>,基于能量梯级利用原理<sup>[6-7]</sup>,分析了海岛柴油发电机的余热构成,对利用柴油发电机余热驱动溴化锂制冷机的两种技术路线进行阐述和对比,并对某海岛的能源需求情况进行深入分析,针对具体情况设计了综合利用该海岛柴油发电机余热的方案,该方案提高了能源利用效率,有效减轻了海岛的供能压力,且能降低岛上的用冷成本,具有较好的经济性。

### 1 柴油发电机余热构成

柴油发电机的能源利用效率比较低,通常发电效率不到40%,柴油燃烧时约有2/3的热能以废气

或缸套水等形式排放到大气中<sup>[2]</sup>。根据热平衡法,在额定负荷工况下,柴油发电机热平衡方程式各部分的组成如表1所示:

表1 柴油发电机热平衡表

热平衡各分项	高速柴油机	中速柴油机	%
转变为有效功的热量	30~40	35~45	
冷却介质带走的热量	20~25	10~20	
烟气带走的热量	35~40	30~40	
其他热量损失	5~10	10~15	

由表1可知:柴油发电机燃料燃烧产生的热量只有30%~45%转化为有效功,其余的热量都没有得到有效利用,其中烟气带走的热量占了很大一部分,因此如何回收柴油发电机烟气带走的热量显得非常重要。

## 2 柴油发电机余热利用方案

目前,柴油发电机的余热利用方式,主要有余热制取淡水,余热用于除湿,余热发电,余热制冷等<sup>[8]</sup>。基于海岛的实际能源需求,下面主要探讨利用柴油发电机余热驱动溴化锂制冷机制冷的方式。

### 2.1 溴化锂吸收式制冷原理

溴化锂吸收式制冷机是一种以低品位热能为驱动动力,以水—溴化锂为工质对,其中水为制冷剂、溴化锂溶液为吸收剂的制冷机组,其基本工作原理为:利用不同温度下溴化锂溶液对水蒸气的吸收与释放来实现制冷<sup>[9]</sup>。

溴化锂吸收式制冷具有以下特点<sup>[10-11]</sup>:

1)以各种低势热能为动力,电能耗用较少,节能效果明显。如能利用各种低势的废气、废热来制冷,例如温度高于250℃的烟气,温度高于90℃的热水等,只需要花费泵的运转费用,便能获得大量的冷源,节电、节能效果明显,经济性高。

2)整个设备没有功率较大的运动部件,因而设备运行时振动小、噪声低。

3)冷量调节范围宽。随着外界负荷变化,机组可在20%~100%的范围内进行冷量无级调节,性能稳定,能很好地适应负荷变化的要求。

### 2.2 以柴油发电机余热作为动力驱动溴化锂制冷机

以烟气余热作为动力驱动溴化锂制冷机的技术

路线有两种<sup>[11]</sup>,其中路线一是采用烟气型溴化锂制冷机,直接利用烟气余热制冷;路线二是采用热水型溴化锂制冷机,间接利用烟气余热制冷。下面将分别对这两种技术路线进行阐述和对比。

#### 2.2.1 技术路线一

技术路线一是通过烟道将柴油发电机的烟气直接引至烟气型溴化锂制冷机制取冷水、热水进行供冷、供热(如图1所示)。这种余热利用方式,溴化锂制冷机运行过程会直接与烟气接触,由于柴油发电机组排放的高温烟气成分比较复杂,其较重成分(油的残留物及其产物)与溴冷机腔体内金属磨粒混在一起,沉积在机体表面,经反复加热容易形成积碳。但这种余热利用方式系统简单,余热利用效率较高,柴油发电机的发电负荷与制冷负荷之比约1:1。

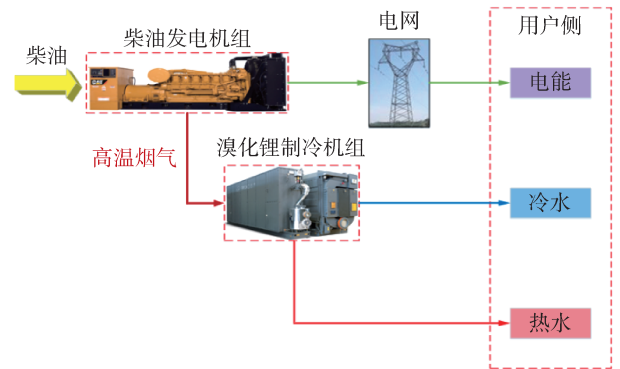


图1 柴油发电机余热利用技术路线一示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the technical route 1 for waste heat utilization of diesel generators

#### 2.2.2 技术路线二

技术路线二是先将柴油发电机排放的高温烟气通过换热器制成热水,再通过热水型溴化锂机组制取冷水,进行供冷(如图2所示)。相比直接采用烟气型溴化锂机组制冷,这种余热利用方式能够有效避免溴化锂机组出现积碳的现象。但这种余热利用方式系统较复杂,余热利用效率较低,柴油发电机的发电负荷与制冷负荷之比约2:1。

## 3 案例介绍

我国南海某海岛发电基地现装设有2×1 GW(3512型)+1×2 GW(3516E型)卡特彼勒柴油发电机组。以该海岛发电基地的柴油发电机余热为研究对象,对海岛的能源需求进行详细分析,然后结

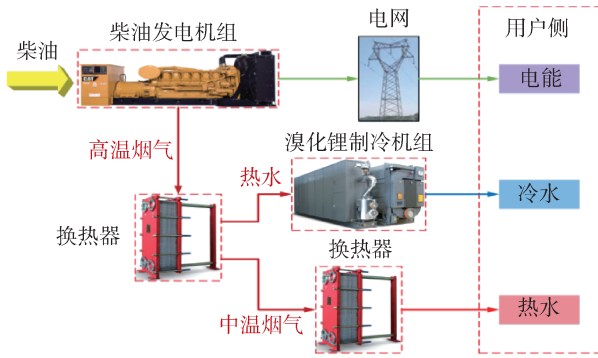


图 2 海岛柴油发电机余热利用技术路线二示意图

Fig. 2 Schematic diagrams of the technical route 2 for waste heat utilization of diesel generators in Islands

合实际情况, 选择合理的柴油发电机余热利用方案, 并对方案进行经济性分析。

### 3.1 能源需求分析

#### 3.1.1 冷负荷分析

考虑到集中供冷的经济性, 供冷半径不宜过大<sup>[12]</sup>, 本案例的冷用户主要以发电基地周边 500 m 范围内的用冷建筑为主。目前发电基地周边 500 m 范围内正在建设的用冷建筑面积约 6 850 m<sup>2</sup>, 通过专用软件对用冷建筑的冷负荷进行逐时模拟计算, 用冷建筑逐月冷负荷如图 3 所示。

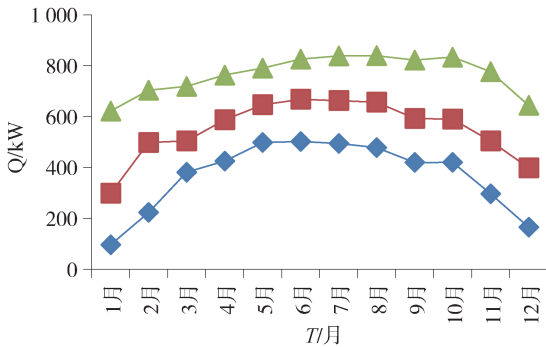


图 3 用冷建筑逐月冷负荷数据

Fig. 3 Using monthly cooling load data for buildings

由以上数据可知:

1) 每年的 2—11 月份, 月平均冷负荷都在 500 kW 以上, 全年平均冷负荷约 555 kW。

2) 月最大冷负荷最大值出现在 8 月份, 约 840 kW。

3) 月最小冷负荷最小值出现在 1 月份, 约 100 kW。

#### 3.1.2 电负荷分析

目前, 全岛的用电负荷最大不超过 2 000 kW。正常情况下, 两台 3512 型柴油发电机组运行(各带 50% 用电负荷), 3516E 型柴油发电机作为备用。图 4 是单台 3512 型柴油发电机冬夏季典型日负荷曲线图。

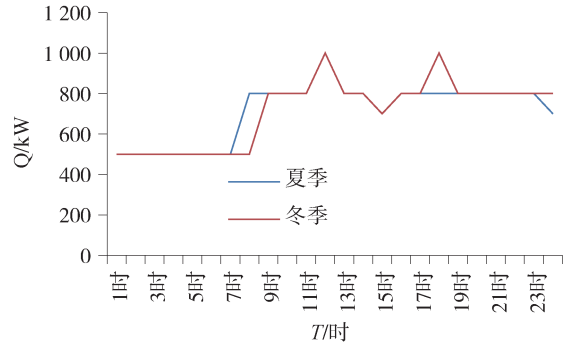


图 4 单台 3512 型柴油发电机冬夏季典型日负荷曲线图

Fig. 4 Typical daily load curve of a single 3512 diesel generator in winter and summer

由以上数据可知:

1) 冬夏季典型日, 全岛最高负荷约 2 000 kW, 两台 3512 型柴油发电机满负荷运行, 3516E 型柴油发电机组作为备用。

2) 冬夏季典型日, 全岛最低负荷约 1 000 kW, 两台 3512 型柴油发电机各运行约 500 kW。

### 3.2 柴油发电机组的烟气余热情况分析

由于本案例中 3516E 型柴油发电机在实际运行中只作为备用, 故只分析 3512 型柴油发电机的余热情况。根据 3512 型柴油发电机实际运行情况, 实际测量机组带 50% ~ 100% 的负荷时, 烟气的排烟温度、排烟流量等参数, 如表 2 所示。并通过计算公式(1) 计算得出柴油发电机组烟气可利用的热量。

表 2 3512 型柴油发电机组的烟气余热情况

Tab. 2 Flue gas waste heat of 3512 diesel generator unit

机组功率/kW	机组负荷/%	进气流量/(Nm <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> )	排烟温度/°C	排烟流量/(kg·hr <sup>-1</sup> )	烟气热量/kW	排烟降至 175°C 的热量/kW
1 000	100	90.5	447.7	7 476.9	1 047	408
900	90	82.3	451.6	6 897.2	943	364
800	80	74.5	448.3	6 329.2	848	312
750	75	70.7	445.4	6 050.7	801	285
700	70	66.9	442.8	5 775.2	754	257
600	60	59.5	434.4	5 236.5	662	203
500	50	52.3	421.9	4 720.6	571	147

柴油发电机排放烟气的热量:

$$Q_r = M \cdot C_p^{T_2} \cdot T_2 - M \cdot C_p^{T_1} \cdot T_1 \quad (1)$$

式中:  $M$  为烟气的质量(kg);  $C_p^{T_2}$ ,  $C_p^{T_1}$  分别表示温度为  $T_2$ 、 $T_1$  时烟气的定压比热容 ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ );  $T_2$  为柴油发电机排烟出口烟气温度;  $T_1$  为排入大气中的烟气温度。

### 3.3 初步方案

本方案的设计有一个核心问题: 技术路线的选择。下面对两种技术路线的选择做简要计算分析。

#### 3.3.1 技术路线一制冷量计算

若采用第一种技术路线, 可用于制冷的烟气热量为:

$$Q_{yr} = Q_2 - Q_1 \quad (2)$$

式中:  $Q_2$  为烟气型溴化锂制冷机进口烟气热量, 约等于柴油发电机排烟出口烟气热量;  $Q_1$  为烟气型溴化锂制冷机出口烟气温度, 本案例选取的某烟气型溴化锂制冷机出口烟气温度为  $175^\circ\text{C}$ 。

烟气型溴化锂制冷机可制取冷量:

$$Q_1 \approx \text{COP} \cdot Q_{yr} \quad (3)$$

式中: COP 为烟气型溴化锂制冷机的能效比, 本案例选取的某烟气型溴化锂制冷机额定工况下 COP = 1.4。

通过公式(1)(2)(3)以及表2数据计算得出: 3512型柴油发电机在额定工况下, 烟气余热可制取冷量约 895 kW, 此时, 发电负荷与制冷负荷之比约 1:1, 余热利用效率较高。而且采用此种技术路线, 在全岛处于最低的用电负荷时, 仍能供应 840 kW 的冷量, 即柴油发电机任何工况下都能满足全部冷能需求。

#### 3.3.2 技术路线二制冷量计算

若采用第二种技术路线, 拟选某进水温度为  $95^\circ\text{C}$ , 出水温度为  $85^\circ\text{C}$  热水型溴化锂制冷机。

烟气—热水换热器的产出热水的热量:

$$Q_{sr} = C \cdot m \cdot (t_2 - t_1) \quad (4)$$

式中:  $C$  为水的比热容 ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ );  $m$  为单位时间热水的质量 ( $\text{kg}/\text{h}$ );  $t_2$ ,  $t_1$  分别为烟气—热水换热器出口、进口水温, 分别对应热水型溴化锂制冷机进水温度和出水温度。

可用于制取热水的烟气热量:

$$K(Q'_2 - Q'_1) = C \cdot m \cdot (t_2 - t_1) \quad (5)$$

式中:  $K$  为烟气—热水换热器的综合换热系数, 可通过换热器设计软件求得;  $Q'_2$  为烟气—热水换热

器进口烟气热量, 约等于柴油发电机排烟出口烟气热量;  $Q_1$  为烟气—热水换热器出口烟气热量, 本案例设计烟气—热水换热器出口烟气温度为  $97^\circ\text{C}$ 。

热水型溴化锂制冷机可制取冷量:

$$Q'_1 \approx \text{COP}' \cdot Q_{sr} \quad (6)$$

式中: COP 为热水型溴化锂制冷机的能效比, 本案例选取的某热水型溴化锂制冷机额定工况下 COP = 0.7。

通过公式(1)(4)(5)(6)计算得出: 3512型柴油发电机在额定工况下, 烟气余热可制取冷量约 476 kW, 此时, 发电负荷与制冷负荷之比约 2:1, 余热利用效率较低。另外, 采用此种技术路线, 有可能存在冷电负荷“不匹配”的情况, 即当全岛处于最低的用电负荷时, 冷负荷的需求超过 500 kW。

考虑到冷电负荷的“匹配”, 供冷的可靠性, 海岛土地资源紧张等问题, 以及本着系统简单优化的原则, 本案例采用前述第一种技术路线。

为避免烟气型溴化锂制冷机严重“积碳”, 可在柴油发电机烟道出口安装烟气粗粒子过滤器, 同时, 在烟气管道及腔体内均增设清扫口, 运行过程中, 适当增加清扫维护频次。

综上, 系统初步方案为: 选择配套建设  $2 \times 840$  kW 某型号烟气型溴化锂制冷机, 采用“一对一”的单元制运行模式。正常情况下, 一运一备。根据前述 3.1.1 分析, 该项目年运行小时数 8 760 h, 全年平均负荷约 555 kW, 年利用小时数约 5 800 h(单台机组)。

### 3.4 技术经济分析

为简化计算模型, 假定利用柴油发电机余热驱动溴化锂制冷机制冷的系统独立投资运作, 冷量销量等于产量, 供冷价格按照海岛电制冷成本价的 80% 计算, 水外购, 作为生产成本考虑, 余热免费。若项目税后全投资收益率大于 8%, 则说明项目具有经济效益, 具备可行性。

根据估算, 项目的静态总投资 1 300 万元, 其中包含供冷管网静态投资 400 万元。项目的技术经济指标如表 3 所示, 项目的财务评价计算参数如表 4 所示。

在上述条件的基础上, 测算出项目全投资收益率达到 9.84%, 已超过评价标准 8%, 项目具备可行性。

表 3 技术经济指标表

Tab. 3 Tables of technical and economic indicators

项 目	参 数
单台机组制冷功率/kW	840
运行机组台数/套	2
机组年利用小时数(单台机组)/h	5 800
全年供冷量/万 kWh	487.2

表 4 财务评价计算参数

Tab. 4 Calculating parameters of financial evaluation

项目	单位	参数	备 注
水价	元/吨	35	—
电价	元/kWh	3.0	—
冷价	元/kWh	0.8	岛上电制冷 COP 按 3.0 计, 则冷价为 1.0 元/kWh(不含设备折旧、人工、水费等)
运营年限	年	10	考虑海岛的特殊性

### 3.5 效益

#### 3.5.1 降低用能成本, 减轻供能压力

该项目可有效的降低用户的用能成本, 减轻供能压力。按制冷价格降低 20% (0.2 元/kWh), 全年供冷量 487.2 万 kWh 计, 每年可为岛上用户降低用能成本约 97 万元。按全年制冷平均负荷 550 kW 计, 项目投产后, 可降低全岛平均用电负荷约 1.375 MW(电制冷 COP 按 2.5 计), 有效地减轻岛上供能压力。

#### 3.5.2 高效环保, 节能减排

该项目实现了能源梯级利用, 相比纯发电方式, 能源利用效率大幅提高。按年供冷量 487.2 万 kWh 计, 项目投产后, 与采用电制冷的的方式比较, 每年可节省电量约 1 218 万 kWh(电制冷 COP 按 2.5 计), 每年可节省柴油约 2 740 吨, 每年可减排 2.5 万吨 NO<sub>2</sub>, 2.9 万吨 SO<sub>2</sub>, 5 200 吨烟尘。

## 4 结论

本文针对当前我国大部分偏远海岛供能形式存在的问题, 以柴油发电机余热利用为研究对象, 对利用柴油发电机余热制冷的系统进行了研究和总结。通过对柴油发电机余热构成的分析, 归纳了柴油发电机余热损失的特点, 介绍了两种以柴油发电机余热作为动力驱动溴化锂制冷机的技术路线, 并做了对比分析。最后, 从分布式供能及能源梯级利用的角度出发, 针对某海岛的具体能源需求, 设计

了综合利用该海岛柴油发电机余热的方案。

通过该方案的研究和设计应用, 实现了柴油发电机与烟气型溴化锂制冷机的有机组合, 充分利用了柴油发电机的“废热”, 实现“变废为宝”, 大大地提高了能源利用效率, 减轻海岛的供能压力, 降低用能成本, 减少污染排放, 对巩固海防, 改善海岛生产生活条件, 具有重大的现实意义。同时, 对探讨柴油内燃机或燃气内燃机余热利用方案配置具有一定的借鉴和参考价值。

#### 参考文献:

- [1] 王海宁, 陶冶. 发展可再生能源是解决海岛能源动力问题的有效途径 [J]. 阳光能源, 2008(3): 49-51.
- [2] 马洪涛, 丁小川, 童航. 分布式供能系统在海岛能源供应中的应用 [J]. 发电与空调, 2012, 33(5): 1-4.
- [3] 崔琳, 吴姗姗, 栾富刚, 等. 可再生能源利用对海岛可持续发展的贡献与问题思考 [J]. 海洋开发与管理, 2016, 33(增刊2): 34-41.
- [4] 印佳敏, 陈泽韩. 天然气分布式能源系统在大型数据中心的应用研究 [J]. 南方能源建设, 2015, 2(2): 52-56.
- [5] 朱晓红, 解蕾, 张延迟, 等. 天然气分布式供能系统的配置与优化 [J]. 节能技术, 2008(1): 87-91.
- [6] 徐明仿, 晏刚, 杜维明, 等. 天然气冷热电三联产系统的应用分析 [J]. 天然气工业, 2004, 24(8): 92-95 +136.
- [7] 龚希武, 李艳红, 张利祥, 等. 小型天然气分布式供能系统的优化配置与评估 [J]. 天然气工业, 2005, 25(11): 123-125 +160.
- [8] 陈志龙. 船舶柴油机余热的分析及利用 [J]. 科技视界, 2016(11): 249 +297.
- [9] 黄挺. 广州大学城分布式能源站供冷系统选型设计 [J]. 南方能源建设, 2017, 4(4): 34-36.
- [10] 吴明. 柴油机余热驱动吸收式制冷的应用研究 [J]. 技术与市场, 2010, 17(12): 45-46.
- [11] 黄镜欢, 施海云. 分布式能源站燃气内燃机的余热利用方式探讨 [J]. 南方能源建设, 2015, 2(2): 66-69.
- [12] 朱纪军, 刘谨. 区域供冷系统及其供冷半径的探讨 [J]. 制冷, 2004(1): 69-72.

#### 作者简介:



YUAN H S

袁韩生(通信作者)

1988-, 男, 广东揭阳人, 工程师, 学士, 主要从事分布式能源研究工作(email)yhsgdut@163.com。

(责任编辑 李辉)